

在姿状態における中ぐり車軸の超音波探傷精度の評価

車両構造技術研究部 車両強度研究室
主任研究員 牧野 一成

1. はじめに

新幹線電車では、中ぐり径 60mm の中ぐり車軸が主に用いられている。新幹線電車の検査種別の一つとして、30 日または走行距離が 3 万 km を超えない期間のいずれか短い期間ごとに交番検査が行われているが、その際、図 1 に示すように、車軸の検査として中ぐり内面から屈折角 50 度の超音波斜角探傷が在姿状態で行われる。超音波探傷で注目すべき検査部位は、車輪とのはめ合い部である車輪座の内ボス側端部だが、在姿状態での検査の場合、車両重量により車軸に作用する曲げモーメントがきずエコーの高さを変化させ、探傷時の感度調整や探傷精度に影響を及ぼすため、きずエコーの定量的な把握が難しい。

そこで、在来線車両用に開発した中ぐり径 40mm の中ぐり車軸を用いて、車輪座に人工きずを加工した車軸を組み込んだ実体輪軸の疲労試験中に超音波探傷試験を行い、疲労の進行あるいは曲げモーメントの方向によるきずエコー高さの変動状況を把握した。本発表では、車軸-車輪はめ合い部の接触状態がきずエコーの挙動に及ぼす影響について、はめ合い部をモデル化し、超音波の反射および透過の観点から評価した結果を報告する。

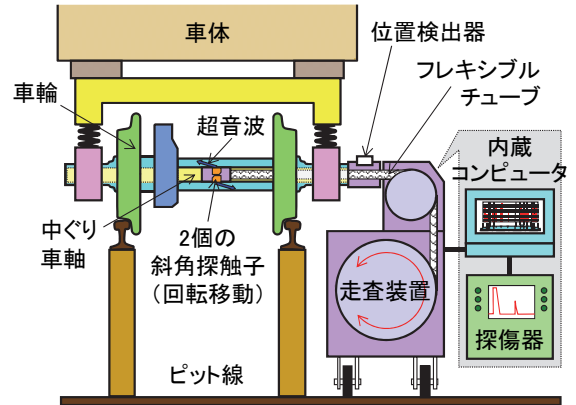


図 1 中ぐり車軸の在姿での超音波探傷

2. 実体輪軸でのきずエコーの測定

2.1 試験輪軸

試験に用いた実体輪軸を図 2 に示す。在来線車両用の軌間 1,067mm の非高周波焼入中ぐり車軸で、車輪座の直径は 193mm、中ぐり径は 40mm である。図 3 に示すように、試験輪軸の車輪座はめ合い端近傍の 4 箇所、円周方向長さ 10mm、深さ 3mm の矩形の人工きず A~D が加工されている。

2.2 超音波探傷装置

中ぐり車軸用超音波自動探傷装置を図 4 に示す。前後の各方向に超音波を入射する斜角探触子を組み込んだ探傷ヘッドを車軸端面から中ぐり孔に挿入し、前後および円周方向に走査して

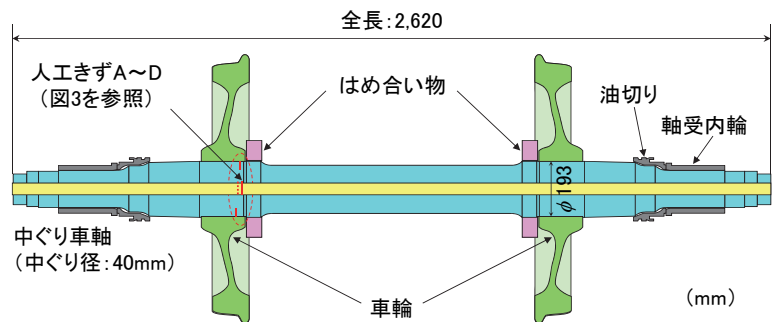


図 2 実体輪軸の模式図

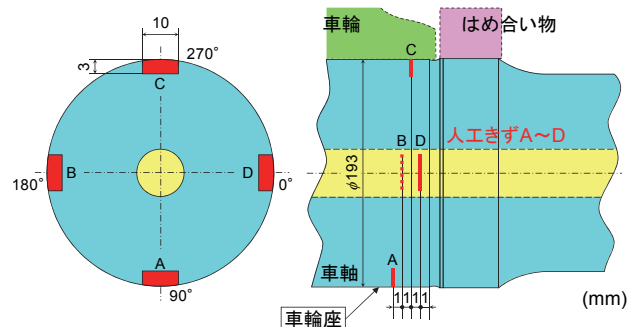


図 3 車輪座の人工きず

探傷する。探触子の公称周波数は 5MHz，屈折角は 45 度で，円周方向にのみ集束する性能（ラインフォーカス）を有する。

2.3 試験方法

車軸に曲げモーメントを負荷するとともに，車輪座を疲労させて接触状態を変化させるため，実体輪軸疲労試験装置を用いて試験を行った。試験輪軸 1 対を組み込んだ試験台車の上から，デッドウェイトにより荷重を負荷した状態で，車輪座に作用させる公称曲げ応力（以下，試験応力）を約 40MPa として $N=5 \times 10^7$ 回（約 13.5 万 km 走行相当）回転させた後，試験応力を約 60MPa に増加してさらに $N=3 \times 10^7$ 回（約 8.1 万 km 走行相当）回転させて疲労試験を終了した。

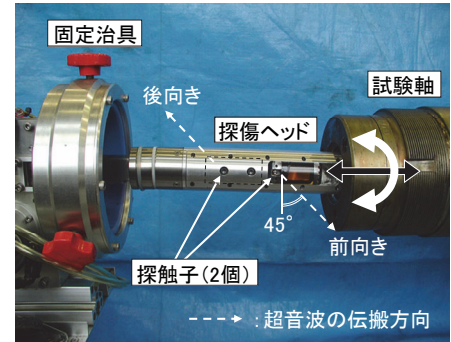


図 4 超音波探傷装置

輪軸を試験台車に組み込んだままの状態，超音波探傷装置を用いて人工きずの探傷試験を行った。探傷中の車軸には常に曲げモーメントが作用している。以下の①～③の各状態で，人工きず D がほぼ真上（0 度）および真下（180 度）の位置となるように輪軸を回転，停止させて探傷し，各人工きずのエコー高さのピークが画面上 80% となる時の探傷器ゲインを測定した。

- ① 試験応力 40MPa で疲労試験開始前
- ② 試験応力 40MPa で疲労試験終了後，試験応力を 60MPa に増加させた状態
- ③ 試験応力 60MPa で疲労試験終了後

2.4 測定結果

超音波を後向きに入射させた場合において，人工きず D の位置が真上および真下となるように輪軸を停止させた時の人工きず B, D のエコー高さ（探傷器ゲイン）を測定し，各人工きずについて輪軸の停止位置によるエコー高さの差を求めた結果を図 5 に示す。これは，各人工きずが車軸の中立軸から上下に離れており，曲げモーメントの影響を最も大きく受ける 2 つの位置での差である。人工きず B は，試験応力を 60MPa に増加させた状態②ではエコー高さの差が約 6dB であったが，疲労試験終了後の状態③では差が小さくなった。一方，人工きず D は，人工きず B よりも変動が小さく，エコー高さの差は疲労試験を通して最大で約 3dB であった。

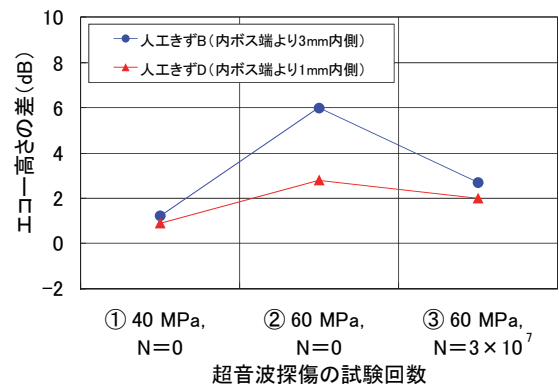


図 5 輪軸の停止位置による人工きずのエコー高さの差

3. はめ合い部のモデル化

3.1 モデルの概要

車軸－車輪はめ合い部をモデル化するため，図 6 に示すスプリング界面モデルを適用する。このモデルでは，垂直界面剛性 K_N およびせん断界面剛性 K_T を定義し，車軸と車輪の締め代による面圧下での超音波の伝搬を表現する。界面剛性は，媒質間の相対距離が単位長さだけ変化した時に発生する垂直またはせん断応力の増分に相当する。角速度 ω の縦波および横波が，媒質 1（車軸）から媒質 2（車輪）

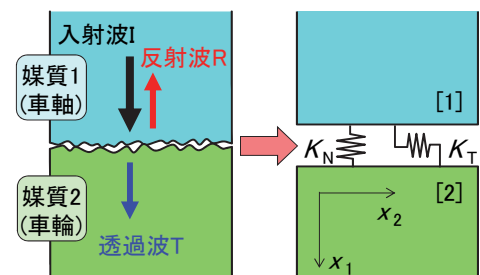


図 6 スプリング界面モデル

へ垂直入射する時，両者の密度 ρ ，縦波音速 C_L ，横波音速 C_T が等しい場合，界面での応力の連続性から K_N および K_T は式(1)で求められる。

$$K_N = \frac{\omega \rho C_L}{2} \sqrt{\frac{1}{R_L^2} - 1}, \quad K_T = \frac{\omega \rho C_T}{2} \sqrt{\frac{1}{R_T^2} - 1} \quad (1)$$

ここで， R_L ， R_T はそれぞれ，縦波および横波の垂直入射時の反射率である。

次に，図7に示すように，媒質1から媒質2へ，式(2)の変位 u_i^{IT} を有する波数 k_T ，角速度 ω の横波ITが，スプリング界面の法線方向に対して角度 η で斜角入射する場合を考える。

$$\begin{pmatrix} u_1^{IT} \\ u_2^{IT} \end{pmatrix} = \mathbf{u}^{-IT} \begin{pmatrix} -\ell_2 \\ \ell_1 \end{pmatrix} \exp\{i[k_T(\ell_1 x_1 + \ell_2 x_2) - \omega t]\} \quad (2)$$

ここで，位置 x_i および変位 u_i^{IT} の指標 i は，1が界面の法線方向，2が接線方向を表し， $\ell_1 = \cos \eta$ ， $\ell_2 = \sin \eta$ である。反射横波RTの角度は η （入射角と等しい）で，反射縦波RLの角度 θ はスネルの法則から求められる。

媒質1と2の材質が同じであれば，透過縦波TLの角度は θ ，透過横波TTの角度は η となり， $n_1 = \cos \theta$ ， $n_2 = \sin \theta$ を用いれば，RL，RT，TL，TTの各波も式(2)と同様の形で表せる。ここで，界面の両側において垂直応力 σ_1 およびせん断応力 σ_6 が連続で，かつ両者の相対変位と界面剛性から生じるばね応力と等しくなるような，式(3)の条件を満足する必要がある。

$$\sigma_1^{[2]} = \sigma_1^{[1]} = K_N(u_1^{[2]} - u_1^{[1]}), \quad \sigma_6^{[2]} = \sigma_6^{[1]} = K_T(u_2^{[2]} - u_2^{[1]}) \quad (3)$$

ここで[1]，[2]は，それぞれ媒質1，2側の $x_1=0$ での値を表す。式(3)を整理すると，入射横波 \bar{u}^{IT} と各波の変位の大きさ \bar{u}^{RL} ， \bar{u}^{RT} ， \bar{u}^{TL} ， \bar{u}^{TT} との間に式(4)の関係が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} -k_L(\lambda + 2\mu n_1^2) & 2k_T \mu \ell_1 \ell_2 & k_L(\lambda + 2\mu n_1^2) & -2k_T \mu \ell_1 \ell_2 \\ 2k_L \mu n_1 n_2 & k_T \mu (\ell_1^2 - \ell_2^2) & 2k_L \mu n_1 n_2 & k_T \mu (\ell_1^2 - \ell_2^2) \\ K_N n_1 & -K_N \ell_2 & K_N n_1 - ik_L(\lambda + 2\mu n_1^2) & -K_N \ell_2 + 2ik_T \mu \ell_1 \ell_2 \\ -K_T n_2 & -K_T \ell_1 & K_T n_2 - 2ik_L \mu n_1 n_2 & K_T \ell_1 - ik_T \mu (\ell_1^2 - \ell_2^2) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \bar{u}^{-RL} \\ \bar{u}^{-RT} \\ \bar{u}^{-TL} \\ \bar{u}^{-TT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2k_T \mu \ell_1 \ell_2 \\ k_T \mu (\ell_1^2 - \ell_2^2) \\ -K_N \ell_2 \\ K_T \ell_1 \end{pmatrix} \bar{u}^{-IT} \quad (4)$$

ここで k_L は縦波の波数， λ ， μ はLaméの定数である。式(4)における入射横波ITと反射横波RTの変位比から，車軸-車輪はめ合い面への横波入射角 η に応じた反射率は， $R_T(\eta) = |\bar{u}^{RT} / \bar{u}^{IT}|$ で求められる。

3.2 界面剛性の導出

実体輪軸と同じ計算上の面圧を有する小型輪軸試験片を用いて，縦波および横波の超音波がはめ合い面に垂直に入射した場合の反射率 R_L ， R_T を測定し，式(1)を用いて界面剛性 K_N ， K_T を導出した。その結果， $K_N = 1.29 \times 10^{15} \text{ N/m}^3$ ， $K_T = 4.64 \times 10^{14} \text{ N/m}^3$ の各値が得られた。

4. はめ合い面での反射率の計算結果

車軸-車輪はめ合い部にスプリング界面モデルを適用し，界面剛性 K_N ， K_T の値を用いて，はめ合い面への横波斜角入射時の反射率を計算した。計算に用いた変数を表1に，横波の入射角 η と反射率 R_T との関係を図8に示す。同図から，入射角 η が45

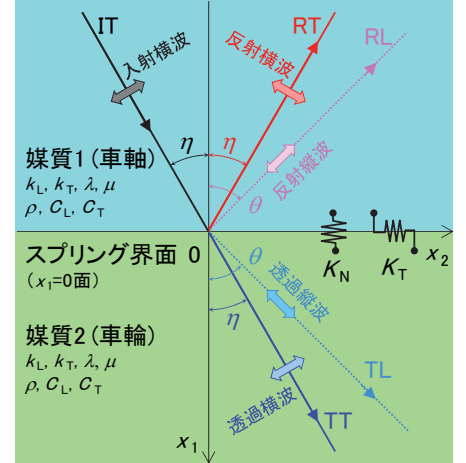


図7 媒質1-2の界面に斜め入射した超音波の反射および透過

表1 スプリング界面モデルで用いた変数

横波入射角	η	0~90°
周波数(角速度)	$f(\omega)$	5 MHz ($3.14 \times 10^7 \text{ rad/s}$)
縦波音速(媒質1, 2)	C_L	5,900 m/s
横波音速(媒質1, 2)	C_T	3,230 m/s
密度(媒質1, 2)	ρ	7,850 kg/m ³
垂直界面剛性	K_N	$1.29 \times 10^{15} \text{ N/m}^3$
せん断界面剛性	K_T	$4.64 \times 10^{14} \text{ N/m}^3$

度の時の反射率 R_T は約 0.40 であった。これは、探傷器ゲインに相当する dB 値に換算すると約 -8.0dB である。

5. 考察

車軸-車輪はめ合い部のきずの斜角探傷では、図 9 に示すように、①はめ合い面および②きずの面で超音波が 2 回反射すると考えられている。実験で用いた実体輪軸のきずは人工きずですきまを有するため、面粗さの影響を除けば、きずの面に入射した超音波はほぼ完全反射する。この場合、エコー高さに最も影響を及ぼすのは、はめ合い面での超音波の反射率である。

図 5 に示したエコー高さの差の変化について考察する。疲労試験開始前の状態①では、車軸と車輪の締め代によってはめ合い面が十分な面圧で密着していたため、曲げモーメントの方向による反射率の変化が少なく、両状態でのエコー高さの差は小さかった。

しかし、疲労が進行するとともに、図 10(a) のようにはめ合い面が摩耗し、曲げの方向に応じて同図(b)のように面のすきまが変化したため、状態②ではエコー高さが最大で約 6dB の差が生じた。さらに摩耗が進んだ状態③では、きずが下側に位置して曲げモーメントが作用した状態でも、はめ合い端の接触が少なく超音波が車輪側へほとんど透過しないため、曲げの方向によるエコー高さの差が再び小さくなったと考えられる。

一方、はめ合い部をモデル化した計算結果から、はめ合い面に横波超音波が 45 度で入射した時、車輪との接触の影響で超音波の反射率が約 8.0dB 低下することが分かった。これは、輪軸に曲げモーメントが作用した時に車輪座で生じる、エコー高さの最大の変動に相当する。実体輪軸ではこの変動が最大で約 6dB であったことから、はめ合い部のモデル化により、はめ合い面でのきずエコーの挙動が定性的に評価された。

6. まとめ

本発表の内容をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 中ぐり車軸の車輪座に存在するきずの超音波斜角探傷において、在姿状態での探傷を想定した車体重量による曲げモーメントが作用する場合に、きずの円周方向位置によってエコー高さが最大で約 6dB 変動した。
- (2) 車軸-車輪はめ合い部にスプリング界面モデルを適用して計算した結果、車軸が車輪と接触することで、きずエコーの高さが約 8.0dB 低下することが分かった。本モデル計算によって、はめ合い面でのきずエコーの挙動が定性的に評価された。

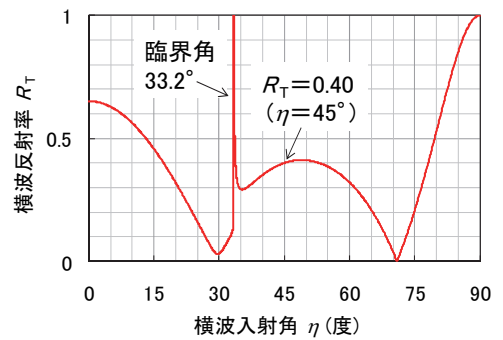
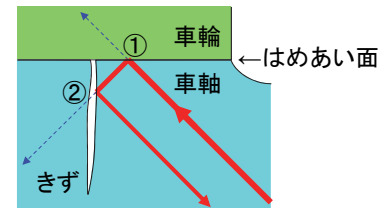
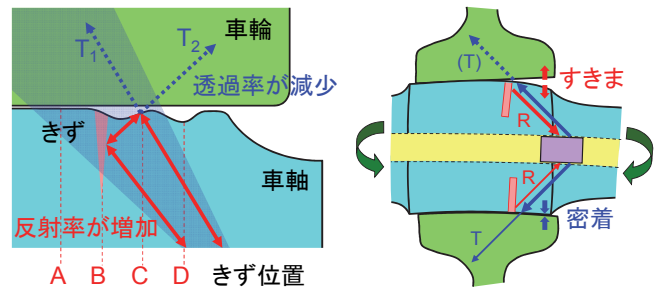


図 8 横波の入射角と反射率の関係



①, ②: 超音波の反射面

図 9 きずでの超音波の反射



(a) 摩耗の影響

(b) 曲げモーメントの影響

図 10 超音波の反射・透過への影響因子